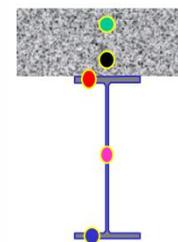
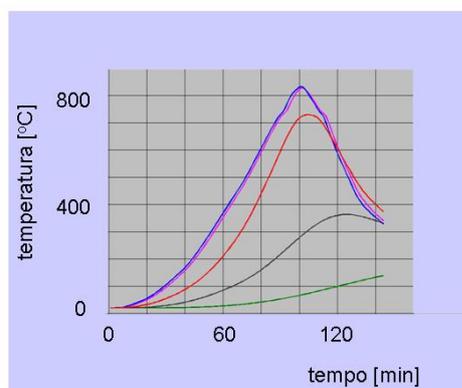
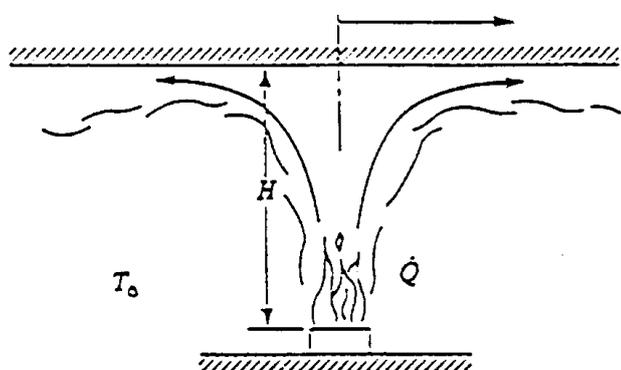


11. Verifica e validazione dei criteri di calcolo per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio mediante l'applicazione dell'approccio ingegneristico.

A cura di:



Premessa

L'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza degli edifici in caso di incendio è regolamentato in ambito nazionale dal Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007. I criteri di calcolo su cui questo approccio è basato sono definiti nell'ambito del nuovo quadro normativo vigente, in particolare nei due Decreti del Ministero dell'Interno del 16 febbraio e 9 marzo 2007, nelle Norme Tecniche per le Costruzioni e nelle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici.

Il presente contributo vuole presentare i criteri di calcolo impiegabili ai sensi delle norme nazionali vigenti per l'applicazione dell'approccio ingegneristico ai fini della sicurezza strutturale in caso di incendio, proponendo una procedura per la verifica della loro applicazione al caso delle strutture di acciaio.

Verifica e validazione dei criteri di calcolo applicati per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio mediante l'approccio ingegneristico

Sandro Pustorino – Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in Caso di Incendio (Coordinatore)

Franco Bontempi – U Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi "La Sapienza" di Roma

Oreste Bursi - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università degli Studi di Trento

Emidio Nigro - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II

Luca Ponticelli - Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

Il presente lavoro è frutto delle attività 2011 condotte dalla Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, istituita e sostenuta da Fondazione Promozione Acciaio.

I criteri di calcolo previsti dalla normativa nazionale vigente

La valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio può essere condotta seguendo due diversi approcci di calcolo:

- l'approccio prescrittivo;
- l'approccio prestazionale (o ingegneristico).

Mentre il primo approccio si sostanzia in una verifica anche per singoli elementi della struttura con riferimento ad una curva nominale di incendio a temperatura uniforme strettamente crescente (in genere la ISO 834, detta curva nominale "standard") per un periodo limitato di tempo (prescritto dal Normatore), il secondo tiene conto di un incendio verosimilmente attribuibile alla struttura (incendio "naturale") e non può prescindere da un'analisi dell'intera struttura da effettuarsi per tutta la durata dell'incendio (compresa la fase di raffreddamento).

In Italia, l'attuale panorama normativo consente di seguire ciascuna delle due strade con le limitazioni indicate nel seguito.

Se l'attività per la quale si deve effettuare la progettazione strutturale a caldo è di tipo "normato" ossia essa è coperta da una specifica regola tecnica di prevenzione incendi, quali le scuole, gli alberghi, le autorimesse etc..., l'unico approccio perseguibile è quello di tipo prescrittivo, con la verifica della "REI" da parte degli elementi strutturali. Solo in caso di necessità di deroga alla regola tecnica di riferimento è consentito l'approccio prestazionale per la verifica del soddisfacimento dei requisiti di resistenza al fuoco, come sancito dal decreto del Ministro dell'interno 9 maggio 2007.

In caso di attività "non normata", è necessario verificare che la stessa sia soggetta o meno ai controlli da parte dei Vigili del Fuoco, in base al decreto del Presidente della Repubblica n. 151 del 1 agosto 2011. In caso affermativo, per la verifica dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture ci si deve riferire al decreto del Ministro dell'interno 9 marzo 2007 che reca la libera scelta tra i due tipi di approccio introdotti ad inizio paragrafo. In caso il progettista opti per l'approccio prescrittivo, la verifica al fuoco dei singoli elementi strutturali andrà condotta con riferimento al cimento termico derivante dall'applicazione della ISO 834 per un periodo di tempo funzione del carico di incendio specifico di progetto, da calcolare con le modalità previste dal DM 9/3/2007. In caso di approccio prestazionale, oltre alla verifica dell'intera struttura per tutta la durata dell'incendio "naturale" preso a riferimento, il progettista dovrà ripetere l'analisi per singoli elementi con riferimento all'incendio standard per una classe pari alla metà di quella per la quale avrebbe dovuto condurre la verifica qualora avesse scelto direttamente l'approccio prescrittivo.

In caso di attività "non normata" e "non soggetta" ai controlli dei Vigili del Fuoco, il progettista deve riferirsi alle NTC 2008 (decreto del Ministro delle infrastrutture 14 gennaio 2008) che, in maniera del tutto analoga a quanto fatto dal DM 9/3/2007, definisce 5 livelli di progettazione strutturale a caldo. Mentre il DM 9/3/2007 esclude l'applicabilità del 1° livello "nessun requisito di resistenza al fuoco" (si ricorda che il DM 9/3/2007 è applicabile ad attività "soggette" "non normate"), il DM 14/1/2008 lascia il progettista libero di scegliere il livello "giusto" per la struttura.

In ultimo, il decreto del Ministro dell'interno 16 febbraio 2007, inerente i requisiti di resistenza al fuoco dei prodotti da costruzione (così come definiti dalla direttiva 89/106/CEE), stabilisce la possibilità di effettuare le verifiche a caldo delle strutture seguendo le tre modalità appresso indicate:

- il metodo tabellare di cui al DM 16/2/2007
- il metodo sperimentale, con classificazione degli elementi in base alla norma europea EN 13501-2, 3 e 4

- il metodo analitico, in base agli Eurocodici strutturali e, fino alla data di pubblicazione degli annessi nazionali delle parti fuoco degli Eurocodici con decreto del Ministro delle infrastrutture, anche con le norme UNI 9502, 9503 e 9504 con le limitazioni indicate dal DM 16/2/2007.

Il DM 14/1/2008 vede nell'impiego degli Eurocodici strutturali l'unica modalità di verifica analitica a caldo delle strutture.

Il procedimento di verifica delle strutture con approccio ingegneristico

L'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio richiede l'analisi e la trattazione di una serie di fenomeni che riguardano sia le fasi dello sviluppo degli incendi che possono verificarsi nell'edificio oggetto dello studio, sia il conseguente comportamento della struttura portante durante l'evoluzione del fenomeno.

Di seguito sono trattati i passi fondamentali del procedimento finalizzato alla valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio. La completezza e la chiarezza della trattazione di ognuno di tali passaggi favorisce il corretto svolgimento delle analisi e rende possibile la validazione delle procedure e la verifica dei risultati ottenuti.

Raccolta dei dati di progetto

I dati di progetto necessari per l'applicazione dell'approccio ingegneristico comprendono tutti i parametri che influenzano in maniera significativa il fenomeno che vogliamo analizzare. Essi includono sia i parametri geometrici dell'edificio attinenti agli obiettivi della sicurezza in caso di incendio, sia quelli che influiscono sull'evoluzione dell'incendio, sia quelli che caratterizzano il comportamento strutturale.

Per quanto riguarda l'edificio nel suo complesso, in generale è necessario includere tra i dati di progetto le seguenti informazioni:

- caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio, dati di solito presenti negli elaborati del progetto architettonico e strutturale;
- tipologia di attività che si svolge nell'edificio;
- eventuale presenza di attività differenti e conseguente presenza di compartimentazioni all'interno dell'edificio.

Per ognuno dei compartimenti presenti nell'edificio è necessario individuare:

- geometria del compartimento;
- condizioni di aerazione naturale;
- caratteristiche dell'involucro del compartimento, pareti, pavimento e soffitto;
- materiali contenuti nel compartimento e corrispondente carico di incendio;
- presenza di fonti di innesco;
- disposizione dei materiali all'interno del compartimento;
- presenza di eventuali impianti e misure di protezione attiva (impianti idrici antincendio, impianti di rivelazione e allarme, impianti di evacuazione fumi e calore, impianti di spegnimento automatici, ...).

Informazioni riguardanti la struttura portante dell'edificio:

- tipologia e geometria strutturale;
- materiali impiegati;
- schemi di vincolo;
- carichi applicati e sollecitazioni sugli elementi;
- caratteristiche dei collegamenti tra gli elementi strutturali;
- presenza di eventuali protezioni antincendio, con indicazione delle caratteristiche termiche dei materiali di protezione adottati e degli eventuali rapporti di qualificazione sperimentali dei singoli sistemi protettivi.

Definizione degli scenari di incendio di progetto

Ai sensi del decreto Ministero dell'Interno 9 maggio 2009 per "scenario di incendio" deve intendersi "la descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi. Di solito può comprendere le seguenti fasi: innesco, crescita, incendio pienamente sviluppato, decadimento. Deve, inoltre, stabilire l'ambiente nel quale si sviluppa l'incendio di progetto ed i sistemi che possono avere impatto sulla sua evoluzione, come ad esempio gli eventuali impianti di protezione attiva". Gli scenari di incendio rappresentano dunque la rappresentazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi. Nel processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, devono essere valutati tutti gli incendi realisticamente ipotizzabili, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la

propagazione dell'incendio. Ovviamente, nell'ambito degli obiettivi della presente trattazione, questa analisi deve essere indirizzata verso i casi che determinano la più pericolosa sollecitazione strutturale.

Un caso progettuale che può essere preso a riferimento per rappresentare il processo di selezione degli scenari di incendio di progetto per l'applicazione dell'approccio ingegneristico alla progettazione strutturale è quello delle autorimesse di tipo aerato. A questo caso progettuale sono stati dedicati alcuni lavori della Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di incendio. Per questa attività e per la tipica tipologia costruttiva di edilizia in acciaio, rappresentate schematicamente in pianta nella fig. 1, gli scenari di incendio di progetto possono essere ricondotti a quelli rappresentati nello schema di fig. 2.

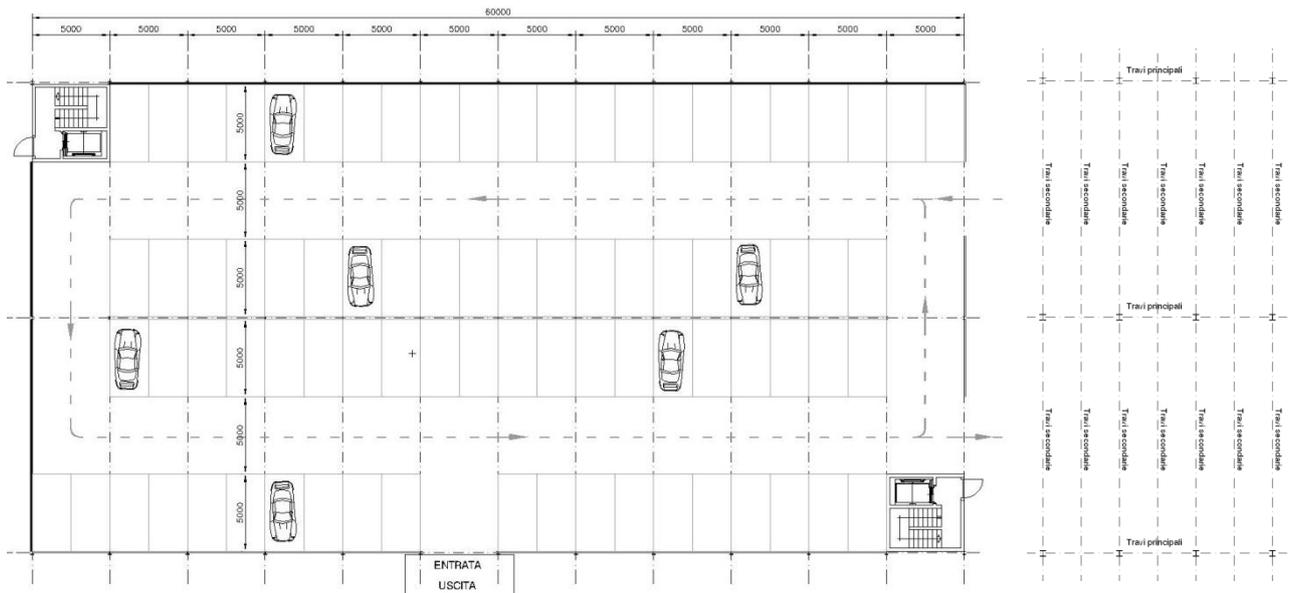
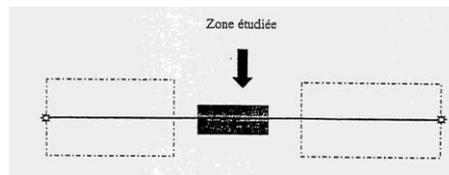
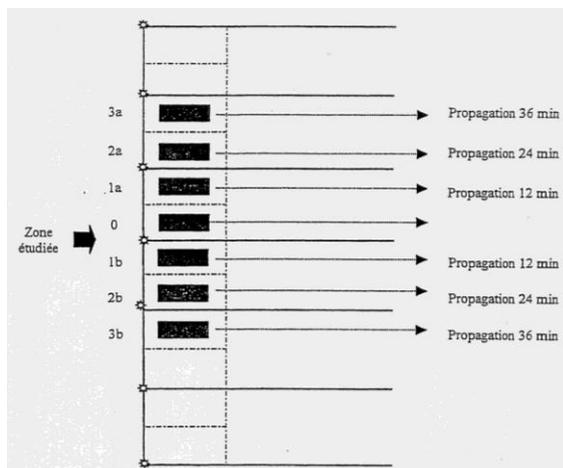


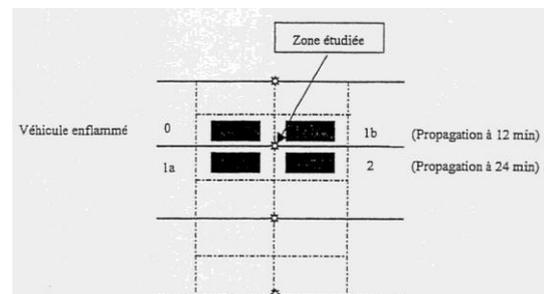
Fig. 1 – Layout e schema delle strutture di acciaio di un'autorimessa di tipo aerato



Scenario di incendio di tipo 1 (da INERIS [13])



Scenario di incendio di tipo 2 (da INERIS [13])



Scenario di incendio di tipo 3 (da INERIS [13])

Fig. 2 – Schema per la definizione degli scenari di incendio di progetto ai fini del calcolo strutturale

La corretta individuazione degli scenari di incendio costituisce la fase centrale nell'ambito del processo di progettazione prestazionale e pertanto è quanto mai opportuno che la loro definizione sia condivisa in fase preventiva da parte dell'organo di controllo VVF.

Determinazione degli incendi naturali di progetto

Il quadro normativo vigente per la progettazione strutturale prevede metodi di calcolo di differente livello per la determinazione dello sviluppo di un incendio. In particolare, l'Eurocodice EN1991-1-2 prevede i seguenti modelli:

- modelli semplici, costituiti dagli incendi parametrici;
- i modelli a zona, che, schematizzando il fenomeno in forme appropriate, permettono di prendere in considerazione tutti i principali parametri che influenzano l'incendio;
- i modelli di campo, piuttosto complessi, che consentono la trattazione completa del fenomeno anche nel caso di particolari geometrie dell'edificio.

A questi modelli generali deve essere aggiunta la procedura di calcolo per la trattazione degli incendi localizzati, mediante la quale è possibile individuare il flusso termico sulle strutture in presenza di un incendio il cui sviluppo è di tipo pre-flashover.

Quando viene simulato numericamente lo sviluppo di un incendio, possono essere eseguite diverse semplificazioni nella dinamica dell'incendio. Di seguito sono descritti sinteticamente i diversi modelli, trattando dapprima quelli che si impiegano nelle situazioni di incendio pre-flashover (modelli di incendio localizzato e modelli a due zone) e poi quelli impiegati nelle situazioni di incendio post-flashover (incendi pienamente sviluppati).

Gli incendi localizzati

In un **incendio localizzato** c'è un'accumulazione di prodotti di combustione in uno strato (strato superiore) posto a contatto con il soffitto ed al di sopra di un'interfaccia orizzontale che lo separa dallo strato inferiore, dove le temperature dei gas si mantengono più fredde.

Questa situazione è ben rappresentata da un **modello a due zone**, valido per tutte le condizioni pre-flashover. Oltre al calcolo dell'evoluzione della temperatura dei gas, questi modelli sono utilizzati per conoscere la propagazione dei fumi negli edifici e stimare le condizioni di vivibilità in funzione dell'altezza dello strato dei fumi, della concentrazione dei gas tossici, del flusso radiante e delle condizioni di visibilità. L'azione termica sugli elementi orizzontali che si trovano al di sopra dell'incendio dipende anche dalla loro distanza da esso. Essa può essere valutata mediante specifici modelli che valutano l'effetto locale su elementi soprastanti l'incendio, come il metodo di Hasemi descritto in EN1991-1-2.

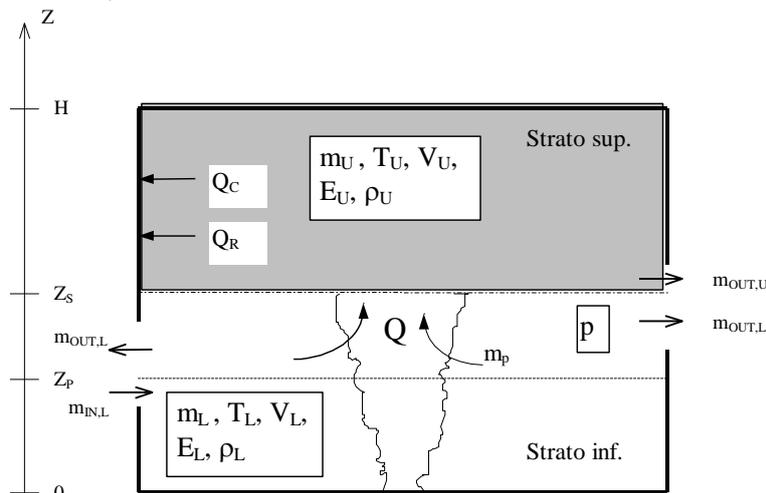


Fig. 3 - Schema di compartimento mediante un modello a due zone

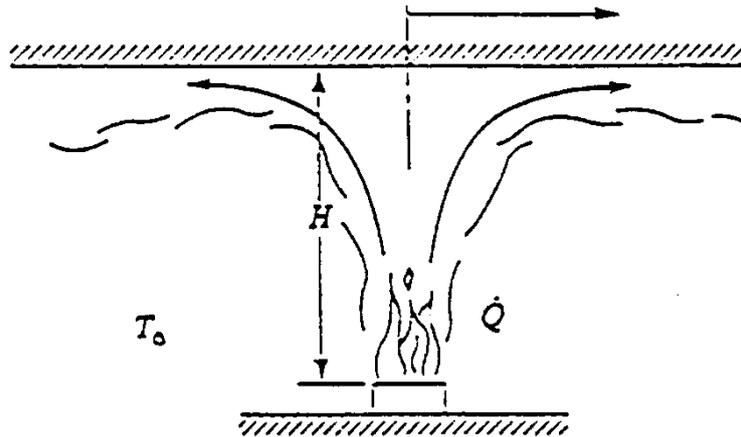


Fig. 4 – Schema di incendio localizzato

Gli incendi pienamente sviluppati

Per modellare un incendio pienamente sviluppato all'interno di un edificio esistono differenti modelli, che di seguito sono sinteticamente presentati.

Gli **incendi parametrici** sono un semplice strumento di calcolo dello sviluppo di un incendio in un edificio che tiene conto dei più importanti parametri fisici che influenzano il fenomeno. Come gli incendi nominali, essi sono definiti da relazioni temperatura-tempo. In questo caso però le relazioni sono definite in funzione di alcuni parametri che caratterizzano lo scenario che si considera. Quasi tutti gli incendi parametrici che si trovano in letteratura sono basati, in un modo o nell'altro, sui seguenti parametri:

- la geometria del compartimento
- il carico di incendio presente nel compartimento
- le aperture presenti nelle pareti e/o nella copertura
- la tipologia e la natura dei diversi elementi costruttivi che formano la frontiera del compartimento.

Un modello di incendio parametrico è previsto nell'ambito dell'Eurocodice EN1991-1-2.

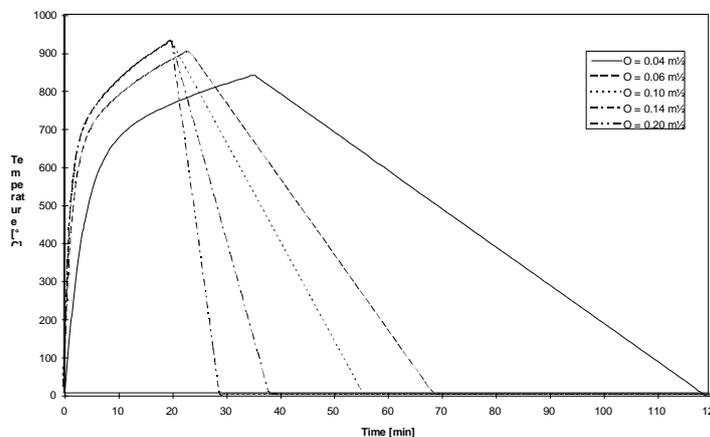


Fig. 5 - Esempio di incendi parametrici.

I **modelli a zona** sono già stati introdotti precedentemente, quando è stata presentata una breve descrizione di un modello a due zone. Il campo di applicazione di un modello a due zone è la fase pre-flashover dell'incendio. Per un incendio pienamente sviluppato devono essere utilizzati i **modelli ad una zona**.

Un modello ad una zona è basato sull'ipotesi fondamentale che, durante l'incendio, la temperatura dei gas all'interno del compartimento è uniforme. Pertanto la sua applicazione è in condizioni di incendio post-flashover.

I dati che devono essere forniti sono molto più dettagliati di quelli necessari per gli incendi parametrici. Essi sono gli stessi di quelli visti per i modelli a due zone.

La fig. 6 mostra come viene schematizzato un compartimento, con la rappresentazione dei diversi termini del bilancio delle masse e delle energie.

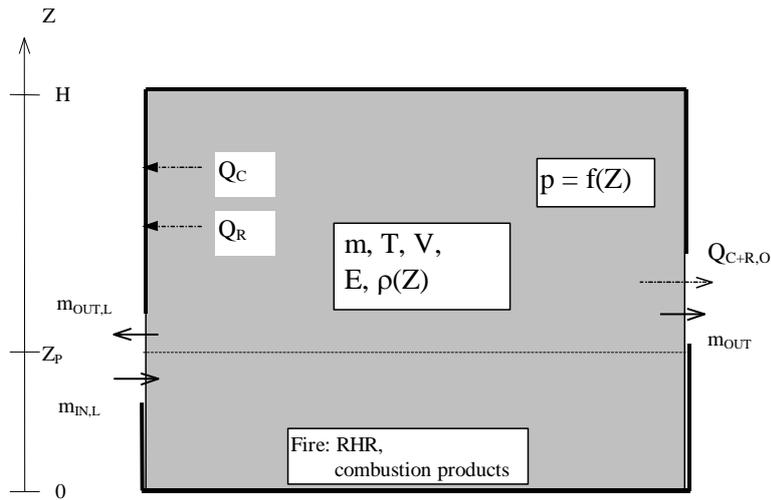


Fig. 6 – Schema di un compartimento mediante un modello ad una zona

Tecniche di modellazione dell'incendio più sofisticate ed avanzate consistono nell'uso di modelli di fluidodinamica computazionale (**modelli di campo o CFD**). I modelli di campo forniscono la stima dell'evoluzione dell'incendio in uno spazio, risolvendo per via numerica le equazioni fondamentali del flusso dei fluidi risultante da un incendio. Questi modelli sono capaci di modellare incendi in fase pre-flashover e localizzati, incendi in fase post-flashover ed anche il movimento dei fumi. La loro applicazione per la determinazione dell'incendio naturale di progetto è prevista nell'ambito dell'Appendice D dell'Eurocodice EN 1991-1-2.

Determinazione delle azioni termiche sugli elementi strutturali: la risposta termica della struttura.

Quando la struttura portante di un edificio si trova in condizioni di incendio è soggetta ad azioni sia di tipo meccanico che di tipo termico. Le azioni termiche sono dovute all'incremento della temperatura dei gas conseguente all'evoluzione dell'incendio e sono determinate dalle condizioni in cui avviene il trasferimento di calore sulle superfici degli elementi strutturali. Il risultato di questo fenomeno, detto risposta termica della struttura, in generale porta ad una dilatazione degli elementi e ad una riduzione delle loro proprietà meccaniche nelle zone in cui si verifica il riscaldamento.

I metodi di calcolo previsti dalle normative vigenti per la determinazione della risposta termica di una struttura di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo possono essere distinti in:

- modelli di calcolo semplificato
- modelli di calcolo avanzato

Nella fig. 7 è presentata la risposta termica di una trave di acciaio non protetto con una soletta di calcestruzzo posta sull'ala superiore, esposta nella parte inferiore alla condizione di incendio naturale [10]. Si può vedere che la temperatura nella flangia inferiore e nell'anima della trave di acciaio sono praticamente identiche. Comunque, l'aumento di temperatura nella flangia superiore avviene con un certo ritardo. Ciò è dovuto al calore perso verso il calcestruzzo relativamente freddo della soletta posta sopra la flangia superiore.

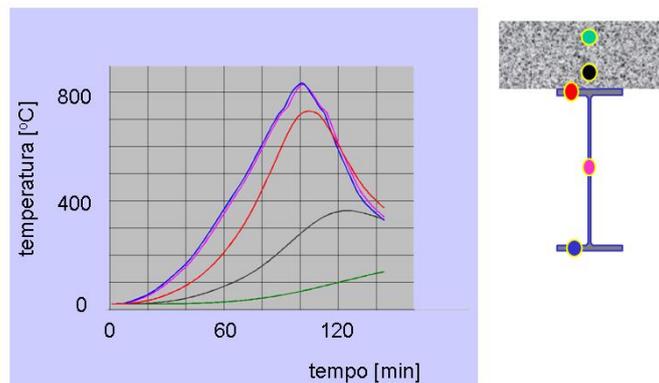


Fig. 7 – Risposta termica (2D): trave di acciaio e solaio in cls

Nella fig. 8 è rappresentata la distribuzione 2D di temperatura in una soletta di calcestruzzo gettata su una lamiera grecata di acciaio dopo 120 minuti di esposizione all'incendio standard, calcolata con DIANA [11]. Inoltre, è eseguita una comparazione tra il campo di temperatura calcolato ed il risultato di prove sperimentali. Risulta un buon accordo tra prove sperimentali e teoria, specialmente nelle aree critiche, nella parte superiore delle nervature (ossia la posizione D nella parte destra della fig. 8). Si noti che la distribuzione della temperatura è significativamente non uniforme. Ciò è dovuto al valore relativamente piccolo della conduttività termica del calcestruzzo.

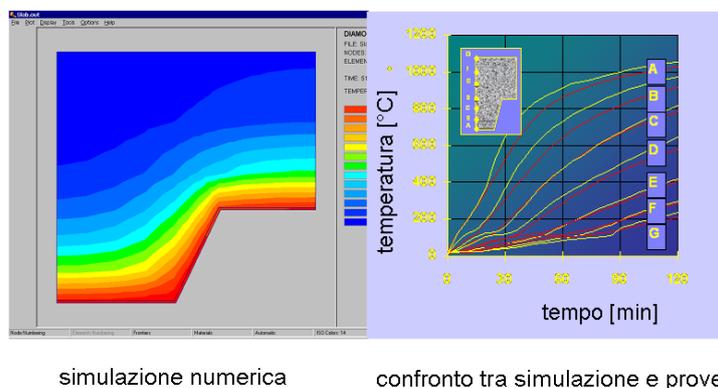


Fig. 8 – Risposta termica (2D): solaio composto acciaio-calcestruzzo

Determinazione della resistenza al fuoco: la risposta meccanica della struttura.

Come già detto, in condizioni di incendio la struttura portante di un edificio è soggetta ad azioni sia di tipo meccanico che di tipo termico. Le azioni meccaniche sono dovute alla presenza dei carichi permanenti e a quella degli altri carichi che agiscono sulla struttura al momento della crisi determinata dall'incendio. A seconda degli schemi statici con cui la struttura è realizzata, la dilatazione termica che accompagna la risposta termica può essere contrastata determinando così sforzi termici indotti non presenti nella struttura nelle condizioni di servizio in cui l'incendio non è presente. Questi sforzi, in combinazione con le azioni meccaniche, determinano uno stato di deformazione della struttura che, in alcuni casi, o in alcune parti, può arrivare a rottura. L'analisi di questo fenomeno, detto risposta meccanica della struttura, ci consente di individuare il parametro che più interessa di una struttura in condizioni di incendio, ossia la sua resistenza al fuoco.

La risposta meccanica di una struttura in condizioni di incendio si ottiene mediante la soluzione dei seguenti passi:

- determinazione delle azioni meccaniche in condizioni di incendio;
- schematizzazione e calcolo strutturale in condizioni di incendio.

Determinazione delle azioni meccaniche in caso di incendio

Le combinazioni di carico per la situazione eccezionale di incendio sono definite secondo la seguente regola, tratta dagli Eurocodici (EN 1990, 2005; EN 1991-1-2, 2002) ma valida anche nell'ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k(t) + (\psi_{1,1} \text{ oppure } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d(t)$$

essendo:

- $G_{k,j}$ valore caratteristico delle azioni permanenti;
- $P_k(t)$ valore caratteristico dell'azione di precompressione;
- $Q_{k,1}$ valore caratteristico dell'azione variabile principale;
- $\psi_{1,1}$ coefficiente di combinazione per il valore frequente della azione variabile principale;
- $\psi_{2,1}$ coefficiente di combinazione per il valore quasi-permanente della azione variabile principale;
- $\psi_{2,i}$ coefficiente di combinazione per il valore quasi-permanente delle altre azioni variabili;
- $Q_{k,j}$ valore caratteristico delle altre azioni variabili;
- $A_d(t)$ valore di progetto dell'azione termica indiretta dovuta all'incendio.

L'utilizzo di $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$, corrispondente al valore "frequente" dell'azione variabile, o di $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$, corrispondente al valore "quasi permanente" dell'azione variabile, deve essere specificato nell'Appendice Nazionale degli Eurocodici. In generale è raccomandato l'uso di $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ ed i coefficienti $\psi_{2,i}$ vengono scelti in base alla destinazione d'uso dell'edificio. $A_d(t)$ è il valore di progetto dell'azione termica indiretta dovuta all'incendio.

Con questo termine ci si riferisce a quelle azioni che possono nascere a causa delle dilatazioni termiche indotte dall'incendio e delle interazioni tra gli elementi della struttura.

Schematizzazione della struttura portante e calcolo strutturale in condizioni di incendio

Per quanto riguarda la verifica della risposta meccanica delle strutture esposte all'incendio, essa può essere fatta secondo i tre approcci seguenti:

- analisi per elementi, in cui ogni elemento della struttura è valutato considerandolo completamente separato dagli altri elementi, mentre le condizioni di vincolo con gli altri elementi sono sostituite con appropriate condizioni al contorno;
- analisi di parti di struttura, in cui una parte della struttura è direttamente presa in considerazione nella valutazione, usando appropriate condizioni al contorno per rappresentare la sua interazione con le altre parti della struttura;
- analisi strutturale globale, in cui tutta la struttura è presa in considerazione nella valutazione.

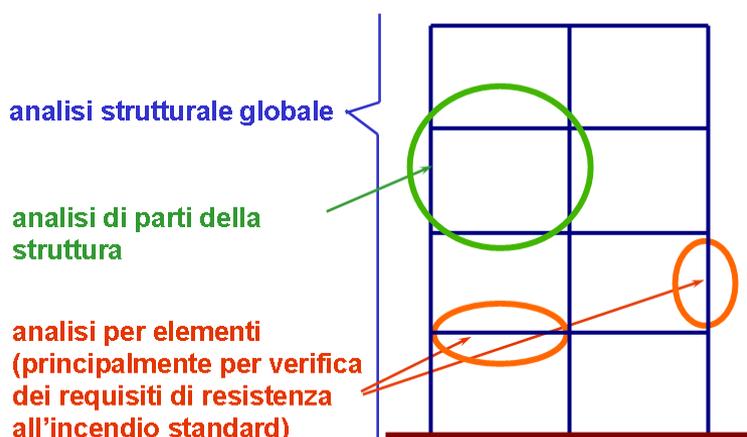


Fig. 9 - *Differenti approcci di progetto per la risposta meccanica all'incendio*

In riferimento alle precedenti procedure di progetto per la valutazione della risposta meccanica delle strutture esposte all'incendio, possono essere fatte le seguenti osservazioni:

- l'analisi per elementi sarà applicata a elementi isolati della struttura (elemento per elemento) perciò è di facile impiego in particolare con i metodi di calcolo semplificati e largamente usata in condizioni di incendio nominale (per esempio: curva di incendio standard ISO 834)
- l'analisi di parti della struttura o l'analisi strutturale globale prende in considerazione almeno alcuni elementi insieme, considerando direttamente l'interazione tra di essi; la redistribuzione dei carichi dalle parti riscaldate (parti indebolite all'interno del compartimento incendio) alle parti fredde (parti più resistenti fuori dal compartimento di incendio) può essere valutata in modo accurato. Di conseguenza l'analisi globale della struttura permette di ottenere un più realistico comportamento meccanico della struttura esposta all'incendio.

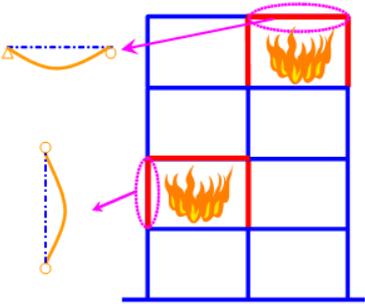
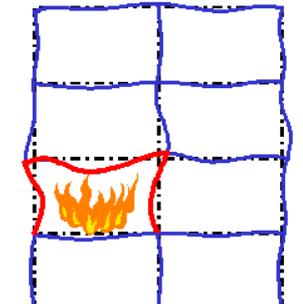
Analisi per elementi	Analisi strutturale globale
	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ analisi di elementi strutturali indipendenti ➤ semplice applicazione ➤ generalmente per curva di incendio nominale 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ effetti di interazione tra le differenti parti della struttura ➤ ruolo del compartimento ➤ stabilità globale

Fig. 10 - Confronto tra i diversi approcci per la risposta meccanica delle strutture esposte all'incendio

Secondo gli attuali Eurocodici, possono essere usati tre tipi di modelli di calcolo per valutare il comportamento meccanico delle strutture in situazione di incendio, all'interno dei differenti approcci di analisi visti sopra. Si nota in particolare:

- metodi di calcolo semplificato basato su dati tabellati, disponibili solo per le strutture composte acciaio-calcestruzzo;
- modelli di calcolo semplificato, che possono essere divisi in due gruppi differenti; il primo è il famoso metodo della temperatura critica, ampiamente applicato all'analisi di elementi strutturali di acciaio, il secondo è costituito da tutti i modelli meccanici semplificati sviluppati per l'analisi di elementi strutturali di acciaio e composti;
- modelli di calcolo avanzati, che possono essere applicato a tutti i tipi di strutture e sono in generale basati o sul metodo agli elementi finiti o sul metodo alle differenze finite; nell'attuale ingegneria della sicurezza all'incendio, sta diventando il metodo sempre più usato a causa dei numerosi vantaggi che fornisce.

Prima di entrare nel dettaglio dell'applicazione di tutti questi metodi, è estremamente importante avere una chiara idea sul dominio di applicazione di questi metodi di progetto. La tab. 1 mostra chiaramente le differenti possibilità di applicazione dei tre metodi di analisi in condizioni di incendio nominale (standard). Si può notare chiaramente che per l'analisi per elementi possono essere usati tutti e tre i metodi di valutazione. In pochissimi casi il metodo di calcolo semplificato può essere applicato all'analisi della resistenza meccanica di parti di strutture esposte al fuoco, per esempio, semplici portali in acciaio. Perciò, il metodo di calcolo semplificato è limitato praticamente solo all'analisi per elementi. Anche in situazione di incendio nominale, il progetto in condizioni di incendio di strutture complesse dovrebbe essere realizzato in generale usando modelli di calcolo avanzato.

Azione termica definita con incendi nominali



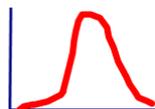
Tipi di analisi	Dati tabellati	Modelli di calcolo semplificati	Modelli di calcolo avanzati
Analisi per elementi	Si ISO-834 incendio standard	Si	Si
Analisi di parti della struttura	Non applicabile	Si (se disponibile)	Si
Analisi strutturale globale	Non applicabile	Non applicabile	Si

Tab. 1 - Dominio di applicazione dei differenti metodi di calcolo in condizioni di incendio

In condizioni di incendio naturale, l'applicazione di metodi di calcolo semplificati è fortemente limitata dal fatto che il riscaldamento dell'elemento è completamente differente da quello che si verifica in condizioni di incendio standard. Questo è il motivo per cui la tab. 2 mostra una maggioranza di situazioni in cui non è applicabile il metodo di calcolo semplificato. L'unico esempio in cui i metodi semplificati possono essere usati è il caso degli elementi di acciaio, con o senza protezioni passive dal fuoco, completamente coinvolti nell'incendio.

Ciò nonostante, l'applicazione dei modelli di calcolo avanzato nel caso di condizioni di incendio naturale non viene limitato, poiché essi permettono la valutazione accurata della risposta termica di tutti gli elementi strutturali, esposti a differenti azioni termiche, e della risposta meccanica di elementi strutturali, di parti di strutture o dell'intera struttura, tenendo conto dei reali coefficienti di riduzione della resistenza e della rigidezza del materiale, dell'effetto dell'espansione termica, dei gradienti di temperatura, ecc.

Azione termica definita con incendi naturali



Tipi di analisi	Dati tabellati	Modelli di calcolo semplificati	Modelli di calcolo avanzati
Analisi per elementi	Non applicabile	Si (se disponibile)	Si
Analisi di parti della struttura	Non applicabile	Non applicabile	Si
Analisi strutturale globale	Non applicabile	Non applicabile	Si

Tab. 2 - Campo di applicazione dei differenti metodi di calcolo in condizioni di incendio naturale

Procedura di validazione e controllo

Una procedura di validazione e controllo deve prevedere almeno i passi seguenti:

- 1) Gli scenari di incendio di progetto

Gli scenari di incendio considerati per la valutazione delle azioni termiche e delle prestazioni della struttura devono essere proposti dal progettista e dal proprietario dell'immobile. Questi scenari indicano chiaramente alcune condizioni limite per l'utilizzazione dei locali, oltre a tutte le misure attive e passive messe in opera e considerate nei calcoli delle prestazioni delle strutture portanti in caso di incendio.

Gli scenari di incendio di progetto devono essere approvati dalle autorità competenti. Questa approvazione deve essere comunicata al proprietario dell'immobile.

2) Le curve di incendio naturale di progetto

Ogni scenario di incendio sarà rappresentato da una curva di incendio naturale che determina l'azione termica che deve essere considerata per il calcolo strutturale. Le curve di incendio naturale sono stabilite per mezzo di un modello di calcolo o di un programma riconosciuto e basato sui criteri definiti in EN1991-1-2 (Eurocodice 1, parte fuoco) e sull'annesso nazionale.

Un metodo o un programma di calcolo è riconosciuto se sufficientemente validato per mezzo di una campagna sperimentale basata su rapporti di prova redatti da organismi riconosciuti.

3) Analisi strutturale in condizioni di incendio

Le prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture sono determinate mediante i criteri di calcolo previsti dalla normativa vigente, in particolare secondo quanto previsto nelle parti fuoco degli Eurocodici, rispettando le indicazioni delle Appendici Nazionali.

Particolare attenzione deve essere prestata alla schematizzazione strutturale e ai metodi di calcolo applicati, rispettando i criteri previsti dalle norme vigenti, in particolare dal decreto 9 marzo 2007 e dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

L'analisi strutturale condotta mediante modelli di calcolo avanzato deve essere condotta per mezzo di un codice di calcolo sufficientemente riconosciuto e calibrato sulla base di prove sperimentali.

4) Validazione della procedura ai fini dell'autorizzazione a costruire

La validazione dell'analisi effettuata dovrà essere fornita da un organismo autorizzato (...) che verificherà i calcoli e in particolare la loro coerenza in rapporto agli scenari scelti e alle norme, e, in caso di conformità, rilascerà una dichiarazione favorevole che permette di ottenere l'autorizzazione a costruire.

Sulla base delle norme nazionali vigenti questa autorizzazione deve avvenire da parte del professionista incaricato del Collaudo delle strutture e da parte del competente organo di controllo VVF.

5) Validazione della procedura ai fini dell'autorizzazione ad inizio attività

Un ufficio di controllo o chi ha fatto la "Validazione della procedura ai fini dell'autorizzazione a costruire" dovrà verificare la conformità della costruzione alle ipotesi assunte per il calcolo e verificherà la corretta esecuzione e la posa in opera delle misure addizionali eventualmente richieste a seguito della verifica. Questo controllo è finalizzato al rilascio del permesso di esercizio all'attività.

Bibliografia

- [1] Decreto del Ministero dell'Interno del 16 febbraio 2007 "*Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione*" (GU n. 74 del 29-3-2007- Suppl. Ordinario n. 87);
- [2] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 marzo 2007 "*Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco*" (GU n. 74 del 29-3-2007- Suppl. Ordinario n.87);
- [3] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio" (G.U. n. 117 del 22-5-2007);
- [4] Norme Tecniche per le Costruzioni, supplemento ordinario della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 4 febbraio 2008, n.29;
- [5] EN 1991.1.2 (Eurocodice 1) "Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco";
- [6] EN 1993.1.2 (Eurocodice 3) "Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio";
- [7] EN 1994.1.2 (Eurocodice 4) "Progettazione delle strutture composte acciaio- calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio";
- [8] ISO/DIS 16730 "Fire Safety Engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods";
- [9] DIFISEK+, Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge, Progetto RFCS, Roma, Istituto Superiore Antincendi, 2 dicembre 2008;
- [10] Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.: "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer". John Wiley & Sons, New York, 1976;
- [11] Twilt, L. et al.: Design tools for the behavior of multi-storey steel-framed buildings exposed to natural fires". Report EUR 20953 EN, European Commission, Science Research and Development, 2004.
- [12] Nigro E., Cefarelli G., Pustorino S., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio", Hoepli, 2010.